

Beurteilung von Volumendefiziten

Struktursimulation auf Basis der Computertomografie

Mit einer Netzgenerierung auf CT-Daten gelingt eine korrekte Abbildung von Bauteildefekten.

VON BEATE LAUTERBACH UND KARL-MICHAEL NIGGE, HEIDELBERG

Um die durch mikrostrukturelle Ungängen verursachten Spannungskonzentrationen bei mechanischer Belastung mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen, ist eine geometrisch präzise Darstellung ihrer komplexen Form in einer numerischen Simulation entscheidend. Daher müssen gemessene Geometrieinformationen aus dem gefertigten Bauteil mit möglichst geringer Vereinfachung in ein Simulationsmodell für das Ist-Bauteil (auch „as-built“-Bauteil genannt) aufgenommen werden. Die benötigten Geometrieinformationen können zerstörungsfrei gewonnen werden, z. B. mittels Computertomografie.

Industrielle Computertomografie

Die 3-D-Computertomografie (CT) gilt heute im Labor und in der Produktion als universelles, zerstörungsfreies Standardprüfverfahren, um sowohl äußere als auch innere Oberflächen eines gefertigten Prüflings oder Bauteils zu identifizieren. Durch die Aufnahme einer Sequenz von Röntgenbildern eines rotierenden Bauteils

kann mit einer speziellen Software ein 3-D-Bild des Bauteils rekonstruiert werden. Der gescannte Prüfling und die ihn umgebende Luft werden durch Voxel dargestellt, die je nach Dichte in unterschiedlichen Grauwerten erscheinen. Durch die Analyse dieser Grauwerte ist es möglich, verschiedene Materialien oder Luft innerhalb eines gescannten Bauteils zu unterscheiden. So

kann das CT-Bild segmentiert und Begrenzungsflächen identifiziert werden (Bild 1), um Oberflächenfehler und unerwünschte Volumendefizite zu ermitteln.

Für die Erfassung von Spannungskonzentrationen, die durch Poren oder Oberflächenkerben verursacht werden, ist es entscheidend, die Konturen der Imperfektionen so genau wie möglich zu bestimm-

KURZFASSUNG:

Mikrostrukturelle Ungängen wie Lunker oder Gasporen sind bei Gussbauteilen unvermeidbar. Mithilfe der Computertomografie (CT) können sie erkannt und quantifiziert werden. Abhängig von ihren geometrischen Eigenschaften (z. B. Form und Größe) sowie ihrer Lage im Bauteil und der Beanspruchung können Volumendefizite als Quelle von Spannungskonzentrationen wirken und die Belastbarkeit des hergestellten Teils mindern. Daher möchte man diese Ungängen in eine Struktursimulation einbeziehen. Da es eine große Anzahl von mikrostrukturellen Fehlstellen gibt, führt deren Einbeziehung in eine klassische Finite-Elemente-Simulation (FE-Simulation) zu einem hohen Aufwand bei der FE-Netzgenerierung und zu großen Simulationsmodellen mit einer hohen Anzahl von Elementen, um die Spannungskonzentrationen in der Umgebung der einzelnen Volumendefizite zu bestimmen. Um diese Vernetzungsprobleme zu überwinden, sind Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methoden besonders geeignet. Da sie kein geometriekonformes Netz benötigen, können sie effizient eingesetzt werden, um lokale Spannungsverteilungen direkt auf CT-Scans zu simulieren, die komplexe Materialstrukturen und innere Ungängen genau darstellen.

men. Da die CT-Bilder aus Voxeln bestehen, die als Würfel mit einer kleinen, aber endlichen Kantenlänge interpretiert werden können, muss die Grauwertinformation entsprechend nachbearbeitet werden, um eine realistische Oberflächeninformation zu erhalten, die nicht den gestuften Konturen folgt, die durch einfaches Folgen der Voxelkontur gebildet werden. Ein einfaches und schnelles Verfahren, die Oberflächen in einem gescannten Bauteil subvoxelgenau zu erkennen, ist die Methode der iso 50-Schwelle [2]. Hierbei wird die Oberfläche aus dem Mittelwert des durchschnittlichen Grauwertes des Materials und des durchschnittlichen Grauwertes der Luft berechnet. Eine neuere, in VGStudio Max von Volume Graphics verfügbare Technik berücksichtigt zusätzlich die lokalen Schwankungen der Grauwerte, um die Qualität der erkannten Oberflächen weiter zu verbessern. Diese Technik erwies sich als sehr genau und eignet sich für die Durchführung von Messaufgaben am gescannten Bauteil, die eine hohe Präzision erfordern [3].

Struktursimulation auf Computertomografiedaten

Um CT-Daten als Quelle für strukturmehchanische Simulationen zu nutzen, müssen die gemessenen und numerisch erfassten Oberflächen des Bauteils in geometrischen Input für ein Simulationsmodell übersetzt werden. Typischerweise wird für strukturmehchanische Simulationen die Finite-Elemente-Methode verwendet. Ein wesentliches Merkmal dieser bekannten numerischen Methode ist die Diskretisierung des Bauteils mit Elementen, die den Konturen des Prüflings folgen. Da die aus der CT-Oberflächenermittlung gewonnenen Konturen recht unregelmäßig sein können, sind tetraedrische Elemente ein geeigneter Elementtyp für die Diskretisierung des aus der 3-D-CT-Rekonstruktion resultierenden Volumenmodells [4]. Um die Form der inneren Ungängen zu erfassen und die durch sie induzierten Spannungskonzentrationen für eine konvergente Lösung ausreichend aufzulösen, ist eine sehr feine Diskretisierung in der Umgebung jeder Ungänge notwendig. Dies führt zu einem hohen Aufwand bei der Modellbildung, da in der Regel zahlreiche Volumendefizite mittels CT erkannt werden (s. Bild 1). Aufgrund der Komplexität der Oberflächen kann die Erstellung eines Finite-Elemente-Netzes mit guter Elementqualität eine zusätzliche Herausforderung darstellen.

Weniger bekannt, aber ebenfalls gut geeignet für die Simulation auf Compu-

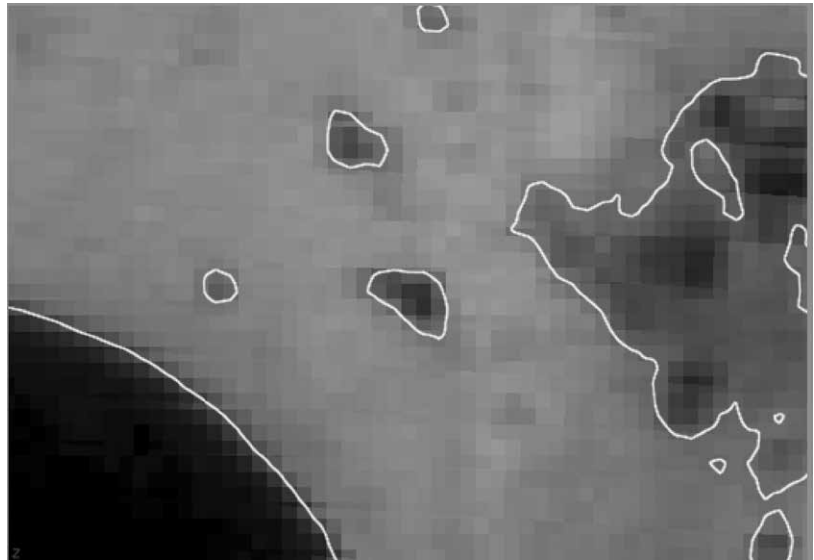


Bild 1: Subvoxel-genaue und lokal adaptive Oberflächenbestimmung in VGStudio MAX aus CT-Voxeldaten.

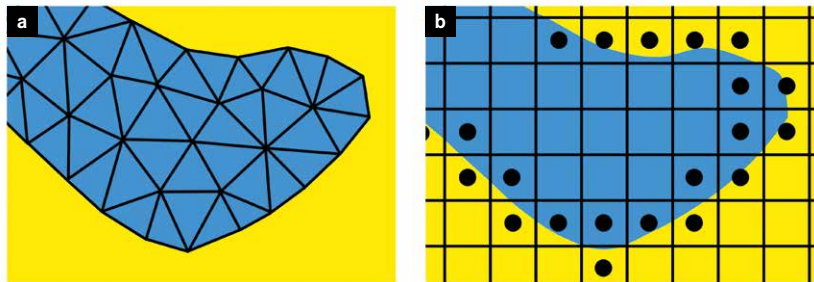


Bild 2: Diskretisierung eines Bauteils (blau) in a) klassischer FE- und b) Immersed-Boundary-Methode. Die mit schwarzen Punkten markierten Elemente benötigen spezielle Integrationstechniken.

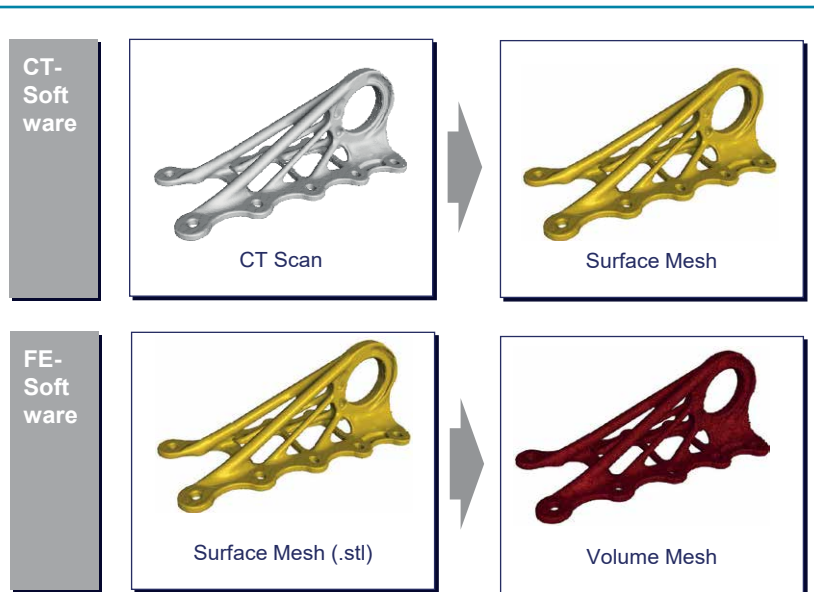


Bild 3: Klassischer Workflow zur Erstellung von FE-Netzen aus CT-Daten.

tertomografie-Daten sind Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methoden, auch bekannt als Fictitious-Domain- oder Embedded-Domain-Methoden [5]. Ob-

wohl ihre Anwendungen hauptsächlich in der Strömungsdynamik liegen, können sie auch zur Lösung strukturmehchanischer Probleme eingesetzt werden [6, 7].

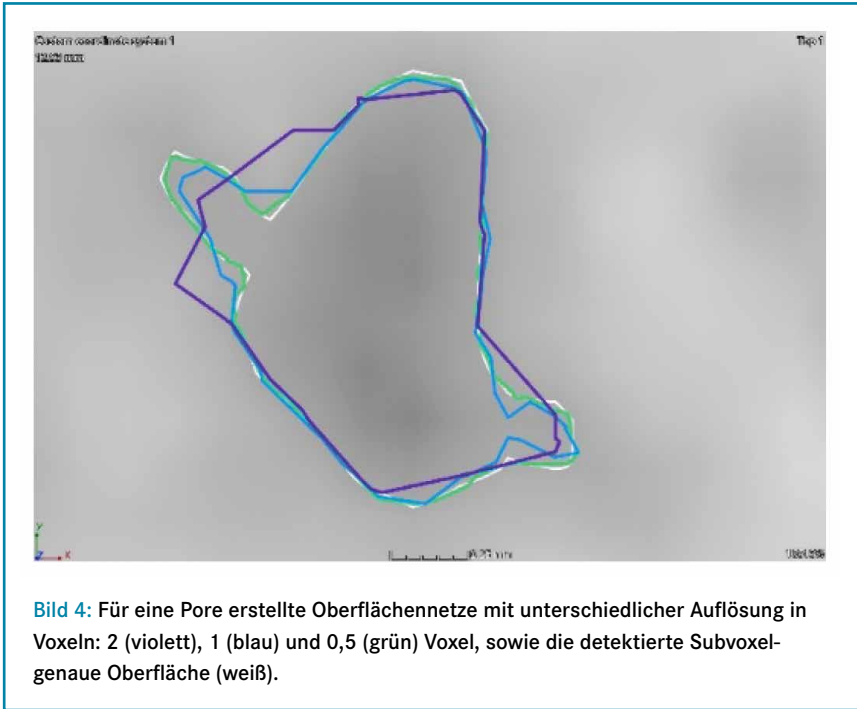


Bild 4: Für eine Pore erstellte Oberflächennetze mit unterschiedlicher Auflösung in Voxeln: 2 (violett), 1 (blau) und 0,5 (grün) Voxel, sowie die detektierte Subvoxelgenaue Oberfläche (weiß).

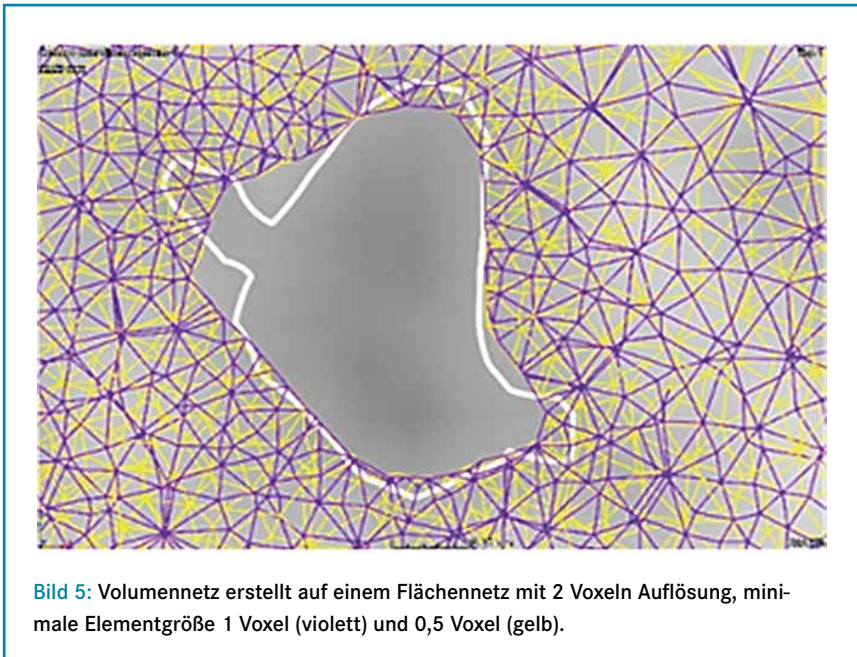


Bild 5: Volumennetz erstellt auf einem Flächennetz mit 2 Voxeln Auflösung, minimale Elementgröße 1 Voxel (violett) und 0,5 Voxel (gelb).

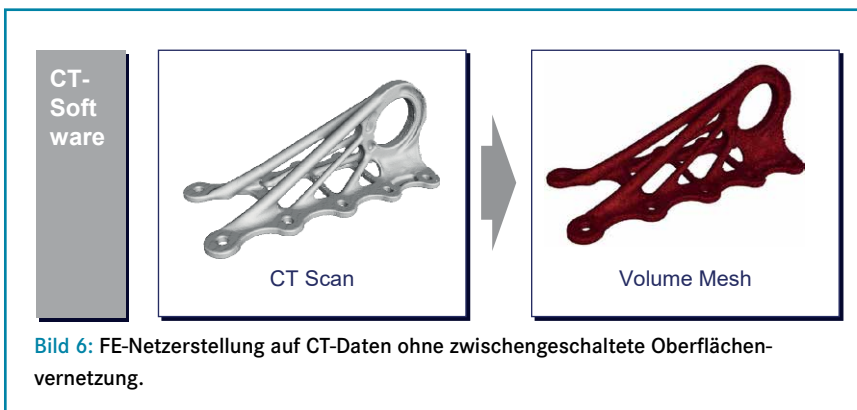


Bild 6: FE-Netzerstellung auf CT-Daten ohne zwischengeschaltete Oberflächenvernetzung.

Im Gegensatz zu klassischen Finite-Elemente-Methoden benötigen sie kein Netz, das der Geometrie des Prüflings folgt, sondern arbeiten mit kartesischen hexa-

edrischen Elementen, die von Natur aus eine gute Elementqualität aufweisen. Dabei wird das Simulationsobjekt in dieses regelmäßige Netz eingebettet. Anders als

bei klassischen FE-Verfahren werden hier Elemente erzeugt, die die Ränder des Simulationsobjekts überlappen. Diese Elemente benötigen eine spezielle Elementintegration, indem nur über den Teil des Elements integriert wird, der das Bauteil überdeckt [8]. Da die mathematische Beschreibung der Flächen aus der CT-Flächenermittlung bereits bekannt ist, kann sie ohne Informationsverlust direkt für die Elementintegration der überlappenden Elemente verwendet werden (Bild 2).

Da keine Vernetzung erforderlich ist, reduziert sich der Preprocessing-Aufwand bei Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methoden im Vergleich zu klassischen Finite-Elemente-Methoden deutlich, wenn FE-Modelle auf CT-Daten aufgebaut werden. Diese Methode ist in VGStudio Max von Volume Graphics für die linear-elastische mechanische Simulation verfügbar. Sie wurde in [9, 10] erläutert und gegenüber physikalischen Tests und Simulationen mit klassischen FE-Methoden validiert.

Spannungsberechnung in der Porenumgebung

Klassische FE-Methoden sind für die Lösung strukturmechanischer Probleme gut etabliert. Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt unter anderem stark von der Qualität des erzeugten FE-Netzes ab:

- > Das Netz sollte in der Lage sein, die Konturen des simulierten Bauteils gut abzubilden. Bei komplexen Oberflächen, wie sie für CT-Daten typisch sind, ist dies keine triviale Aufgabe und kann kleine Elemente zur adäquaten geometrischen Darstellung kleiner Radien erfordern.

- > Die Elemente müssen klein genug sein, um die Spannungsgradienten mit ausreichender Genauigkeit aufzulösen.

- > Die FE-Elementqualität muss, gemessen an bekannten Elementqualitätsmetriken, erfüllt sein.

Der klassische Weg, FE-Netze auf CT-Daten zu erstellen, besteht darin, ein Oberflächennetz aus den in der CT-Software ermittelten Oberflächen zu erzeugen. Das Oberflächennetz wird dann exportiert und in einen FE-Preprozessor importiert, um ein volumetrisches FE-Netz mit denselben Regeln zu erstellen, die bei der Vernetzung von viel weniger komplexen CAD-Oberflächen verwendet werden (Bild 3).

Obwohl es im Allgemeinen funktioniert, führt dieser Arbeitsablauf oft zu viel manueller Arbeit beim Reparieren und Anpassen von Oberflächennetzen für die Volumenvernetzung. Außerdem ge-

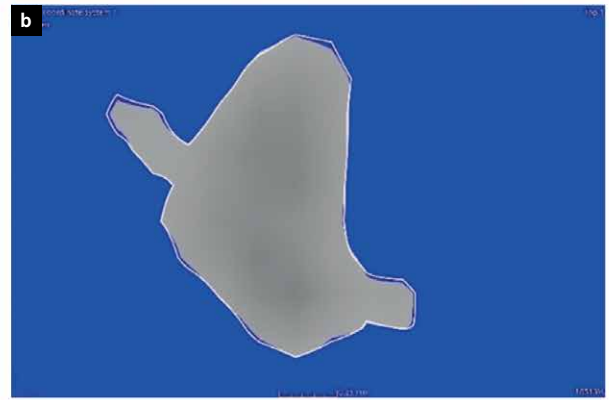
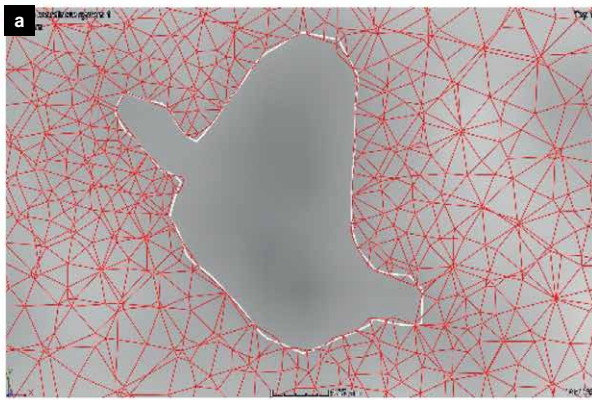


Bild 7: a) Direkt auf der subvoxelgenauen Oberflächenbestimmung erzeugtes volumetrisches, tetraedrisches Netz (minimale Elementgröße 0,1 Voxel). Die Elemente folgen den Konturen der Oberfläche; b) Simulationsgebiet in der Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode blau dargestellt, die Kontur der subvoxelgenauen Oberflächenbestimmung wird direkt aufgetragen.

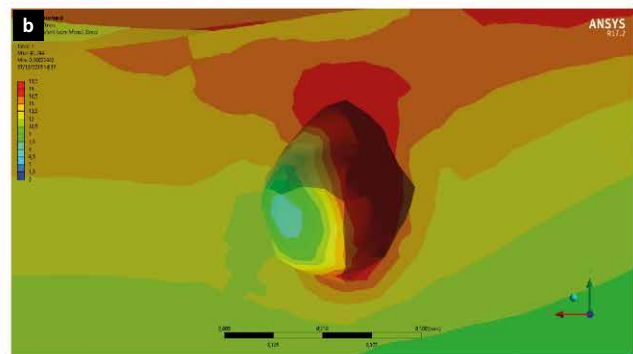
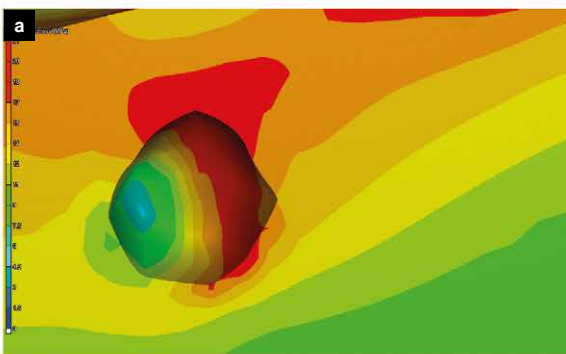


Bild 8: Spannungsfeld um eine Pore: a) Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode, b) klassische Finite-Elemente-Methode (Software ANSYS).

hen nach dem Exportieren des Oberflächennetzes die ursprünglichen Oberflächeninformationen verloren, z. B. für die Netzverfeinerung oder die Überprüfung der geometrischen Genauigkeit. Daher ist es wichtig, dass bei der Erstellung des Oberflächennetzes Informationen über die geforderte geometrische Genauigkeit des endgültigen FE-Netzes vorhanden sind und berücksichtigt werden. Die Auflösung des Oberflächennetzes sollte die im CT-Scan erfassten geometrischen Merkmale entsprechend darstellen (Bild 4) und muss gleich oder höher sein als die geplante geometrische Auflösung des volumetrischen FE-Netzes. Ein feines volumetrisches FE-Netz, das auf einem groben aus der CT-Software importierten Oberflächennetz erstellt wurde, wird nicht der korrekten Kontur folgen und somit zu falschen Spannungsfeldern führen (Bild 5).

Dies kann leicht überwunden werden, indem das endgültige FE-Netz auf der Grundlage der ursprünglichen Geometrieinformationen innerhalb der CT-Software erstellt wird (Bild 6). Dieser Workflow ist nicht nur einfacher, weil man damit den Schritt der Oberflächenvernetzung über-

springen kann, sondern ermöglicht auch die Erstellung eines FE-Netzes, das immer mit den ermittelten Oberflächen übereinstimmt, unabhängig von deren Komplexität und der gewählten FE-Netzgröße.

Da die Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode die subvoxelgenaue Oberflächenbestimmungsinformation direkt berücksichtigt, wird die Wahl der geeigneten Elementgröße nur durch den aufzulösenden Spannungsgradienten bestimmt. Somit ist die geometrische Genauigkeit von der Genauigkeit des numerischen Verfahrens entkoppelt.

Um die Geometrie von Poren in einem klassischen FE-Netz mit linearen Elementen abzubilden, muss die Elementgröße unter Umständen weit unterhalb der Voxelabmessungen festgelegt werden, um die Eigenschaften der subvoxelgenauen Oberflächenbestimmung zu erfassen. In Bild 7a wurde eine Netzgröße um die Pore herum von 0,1 Voxel gewählt, um eine Geometrieapproximation zu erhalten, die mit der Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode vergleichbar ist (Bild 7 b, Simulationsbereich in blau). Dies führt zu großen FE-Modellen. Es wird deutlich, dass beim Vergleich der Ergebnisse aus

klassischen FE-Simulationen mit der Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode neben einem Netz, das den lokalen Spannungsgradienten auflösen kann, auch eine gute Auflösung der Geometrie in der klassischen FE-Methode gewährleistet sein muss. Ein Beispiel zeigt Bild 8, das das Spannungsfeld um eine Pore in einem linear-elastischen Material mit der Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode und mit einer klassischen Finite-Elemente-Methode vergleicht.

Die lokale Spannungsverteilung um die Pore ist hinsichtlich der Größe und der räumlichen Verteilung vergleichbar. Durch die Anwendung der Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode ist es möglich, alle ca. 1900 detektierten Poren mit Porendurchmessern von 0,38 mm bis 7,37 mm in das Simulationsmodell aufzunehmen. Da die Geometrie der Pore mit der Genauigkeit der subvoxelgenauen Oberflächenbestimmung in das Modell eingeht und somit unabhängig von der Elementgröße ist, wurde die Simulation mit einer minimalen Elementgröße von 0,13 mm durchgeführt, die zur Auflösung des Spannungsgradienten ausreicht. Bei einer klassischen Finite-Elemente-Simu-

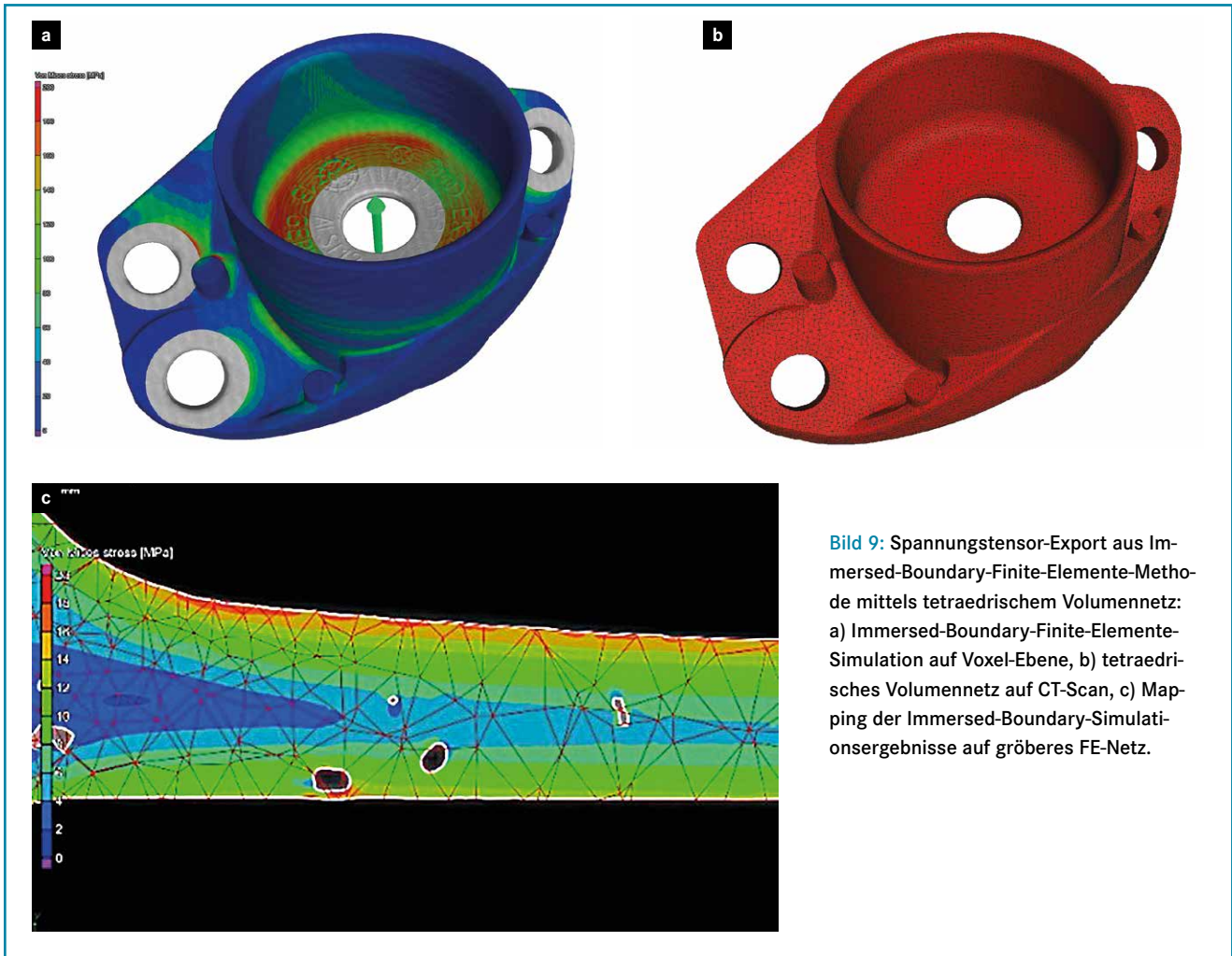


Bild 9: Spannungstensor-Export aus Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode mittels tetraedrischem Volumennetz: a) Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Simulation auf Voxel-Ebene, b) tetraedrisches Volumennetz auf CT-Scan, c) Mapping der Immersed-Boundary-Simulationsergebnisse auf gröberes FE-Netz.

lation reicht diese minimale Elementgröße nicht aus, um die Porengeometrie vergleichbar darzustellen. Daher muss die minimale Elementgröße um die Poren herum deutlich reduziert werden, auf durchschnittlich 0,06 mm.

Die Erstellung eines klassischen Finite-Elemente-Netzes, das alle detektierten Poren mit der gleichen geometrischen Genauigkeit der Pore wie bei der Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode einschließt, würde zu einem sehr großen Netz von mehr als 20 Millionen Elementen führen. Dies ist eine Modellgröße, die kaum zu handhaben ist. Daher wurde die Simulation mit reduzierter Porosität durchgeführt, wobei nur fünf Poren berücksichtigt wurden. Eine lokale Netzverfeinerung um die Poren herum, wie oben beschrieben, wurde angewendet, um die Geometrie der Pore genau darzustellen. So wurde die endgültige Anzahl der Elemente auf ca. 4 Millionen tetraedrische Elemente reduziert.

Anwendungsworkflows

Bewertung von Bruch und Ermüdung

Grundsätzlich führt das Spannungsfeld um Poren in linear-elastischem Material,

das mit klassischen FE-Methoden und Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methoden ermittelt wird, zu ähnlichen Ergebnissen. Der große Vorteil der Immersed-Boundary-FE-Methode ist der schnelle und einfache Aufbau des Simulationsmodells, der es auch Nicht-Simulationsexperten ermöglicht, eine Struktursimulation mit einer hohen Auflösung des Spannungsfeldes um die erkannten Volumendefizite durchzuführen. Da die geometrische Genauigkeit der Porenoberfläche der Methode inhärent ist, kann sie auf Fragestellungen angewendet werden, die von lokalen Spannungsfeldern bestimmt werden, wie z. B. Bruch- oder Ermüdungsbewertung. Insbesondere bei der Ermüdungsbeurteilung wird sehr häufig die linear-elastische Berechnung des Spannungsfeldes mit anschließender Neuber-Korrektur [11] verwendet. Daher können die Ergebnisse der Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Simulation problemlos als Grundlage für die Ermüdungsbewertung verwendet werden.

Um mit der auf klassischen FE-Methoden basierenden Software zur Ermüdungsbewertung kompatibel zu sein, kann der aus der Immersed-Boundary-

Finite-Elemente-Simulation berechnete Spannungstensor auf ein klassisches FE-Netz abgebildet werden (Bild 9). Dabei ist zu beachten, dass Mapping in diesem Sinne nicht bedeutet, dass das Spannungsfeld über das in der Regel gröbere Finite-Elemente-Netz gemittelt wird, sondern dass jedem finiten Element der maximale Spannungswert aus der Immersed-Boundary-Simulation innerhalb des vom finiten Element abgedeckten Volumens zugeordnet wird. Das Netz wird bei diesem Verfahren also nur als Träger für die Spannungswerte verwendet.

Vorselektion kritischer Poren

Für zahlreiche Simulationsaufgaben ist es notwendig, die erweiterten Funktionalitäten zu nutzen, die ein vollwertiger Struktur-FE-Solver bietet, wie z. B. nichtlineare Materialmodelle, nichtlineare Kinematik oder komplexe Kontaktbedingungen. In diesem Fall ist es unumgänglich, mit einem geometriekonformen Netz zu arbeiten. Prinzipiell kann ein tetraedrisches Netz mit hoher Genauigkeit und ausreichender Netzverfeinerung um jede der zahlreichen Ungängen in einer Bestandsstruktur erzeugt werden, z.B. mit den oben beschriebenen VGStudio Max-Funktionen.

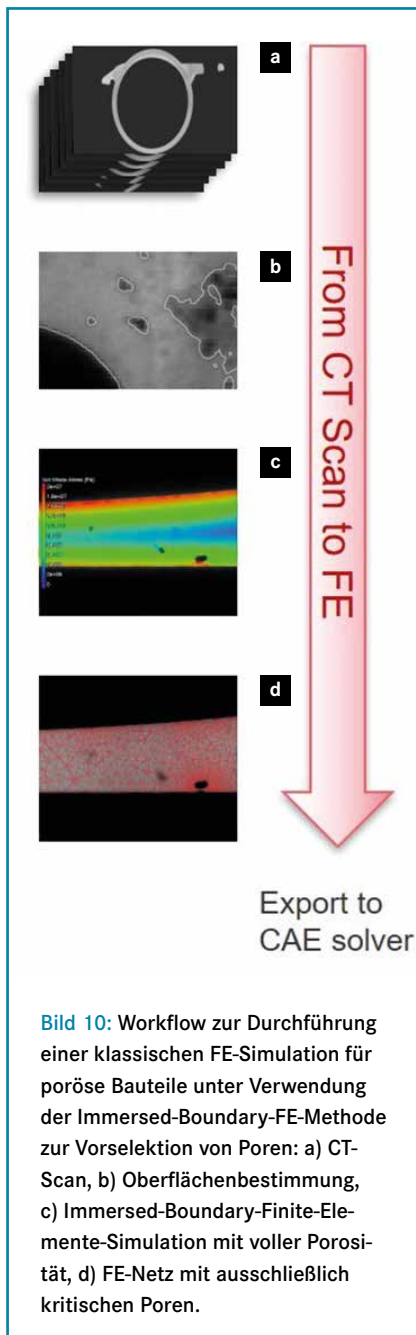


Bild 10: Workflow zur Durchführung einer klassischen FE-Simulation für poröse Bauteile unter Verwendung der Immersed-Boundary-FE-Methode zur Vorselektion von Poren: a) CT-Scan, b) Oberflächenbestimmung, c) Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Simulation mit voller Porosität, d) FE-Netz mit ausschließlich kritischen Poren.

Insbesondere für nichtlineare Simulationen ist die resultierende Anzahl von Freiheitsgraden zu hoch für eine effiziente Simulation. Indem nur kritische Volumendefizite in das Simulationsmodell aufgenommen und alle anderen vernachlässigt werden, lässt sich die Modellgröße deutlich reduzieren. Die Identifikation der kritischen Poren kann durch eine Vorsimulation mit der Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methode erfolgen (Bild 10). Da die Modellerstellung einfach und schnell ist, bedeutet die Vorselektion keinen großen Mehraufwand im Arbeitsablauf. Basierend auf den vorausgewählten Poren kann ein geeignetes Finite-Elemente-Netz erstellt werden, das einen guten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Effizienz darstellt.

Zusammenfassung

Immersed-Boundary-Finite-Elemente-Methoden eignen sich gut für die Struktursimulation von Bauteilen im Ist-Zustand, bei denen die geometrischen Informationen über äußere und innere Oberflächen durch CT gewonnen werden können. Da sie kein geometriekonformes Netz benötigen, wird der geometrische Diskretisierungsfehler minimiert und die Modellerstellung ist sehr einfach. Obwohl die in VGStudio Max implementierte Methode auf linear-elastische Probleme beschränkt ist, kann sie auch für die Ermüdungsbewertung verwendet werden, da sie ein detailliertes Spannungsergebnis liefert. Darüber hinaus kann sie als Vorauswahlmethode zur Identifizierung kritischer Poren verwendet werden und ermöglicht so nichtlineare klassische FE-Simulationen.

www.volumegraphics.de

Prof. Dr.-Ing. Beate Lauterbach, Technische Hochschule Mittelhessen und Dr.-Ing. Karl-Michael Nigge, Chief Product Officer, Volume Graphics GmbH

Literatur:

- [1] *Journal of Materials Science* 32 (1997), S. 4731 – 4736.
- [2] Tan, Y. et al.: *Material dependent thresholding for dimensional X-ray computed tomography*. In: *Intern. symp. on digital industrial radiology and computed tomography*. June 2011.
- [3] Bircher, B. et al.: *X-ray source tracking to compensate focal spot drifts for dimensional CT measurements*. *10th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria (iCT 2020)*.
- [4] *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik* 98 (2018),

S. 682-695.

- [5] Düster, A. et al.: *The p-Version of the Finite Element and Finite Cell Methods*. *Encyclopedia of Computational Mechanics Second Edition*, John Wiley & Sons, Ltd, 2017.
- [6] *Archives of Computational Methods in Engineering* 22 (2015), [Nr. 3], S. 391 – 455.
- [7] *International Journal of Cast Metals Research* 28 (2015), [Nr. 4], S. 221–228.
- [8] Höllig, K.: *Finite Element Methods with B-Splines*. *Siam Frontiers in Applied Mathematics*, 2003
- [9] Fieres, J. et al.: *Predicting failure in additively manufactured parts using X-ray computed tomography and simulation*. *7th International Conference on Fatigue Design, Fatigue Design 2017, 29-30 November 2017, Senlis, France*
- [10] Fieres, J. et al.: *Fast and Accurate Simulation of Manufactured Parts with Defects*, *Tech Briefs* 43 (2019), [Nr. 05].
- [11] Neuber, H.: *Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law*, *Journal of Applied Mechanics* 28 (1961), [Nr. 4], S. 544-550.



3D-gedruckte Gusslösungen

Komplexe Bauteile umsetzen

Innovative 3D-Drucklösungen im Sand- & Feinguss durch die Verwendung gießereüblicher Materialien: Dabei lassen sich alle vergießbaren Leicht- und Schwermetalle in serienvergleichbarer Qualität verarbeiten. Komplexe Geometrien können präzise und zeitsparend umgesetzt werden.

Mehr zu 3D Drucksystemen und -services:

Tel +49 821 74 83-100 / www.voxeljet.com **voxeljet**